冰冻圈工程学助力互联互通基础设施建设

吴青柏[1*]　李志军[2]　沈永平[1]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室 兰州 730000
2 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室 大连 116024

摘要　冰冻圈与气候变化、人类工程活动和社会经济发展具有极为密切的关系，冰冻圈变化及其引发的冰冻圈灾害使寒区工程建设和安全运营面临着巨大的挑战。冰冻圈各要素对重大工程影响具有显著不同的特点，冰川、积雪、海（河、湖）冰等主要以灾害方式影响重大工程的建设、安全运营和服役性。冻土作为工程构筑物的特殊地基土，冻融灾害和冻土热力学稳定性变化均会直接影响工程的稳定性。随着全球气候环境变化，冰冻圈各要素变化及其水文、生态环境、地表过程等变化均对重大工程产生显著的影响，需加强重大工程建设和安全运营与环境因素变化之间关系研究，重大工程安全保障技术也需更加综合地考虑气候和环境变化的影响。因此，气候和环境变化将成为未来冰冻圈区重大工程建设、安全运营和工程服役性必须考虑的重要因素。同时，“一带一路”基础设施建设不仅给冰冻圈工程学带来机遇，而且也使其面临更大的挑战。

关键词　冰冻圈，工程，气候变化，“一带一路”

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200301001

冰冻圈区域蕴藏着丰富的石油、天然气和矿产资源等，社会经济发展和资源开发利用必然涉及公路、铁路、水路、机场、输电线路、油气管道和港口码头等基础设施建设。在冰冻圈区域开展基础设施建设将会受到冰冻圈各要素的制约；同时，基础设施建设也会对冰冻圈各要素产生影响。通过冰冻圈各要素分布规律和变化过程，以及冰冻圈灾害与工程之间互馈关系的研究，提出解决重大工程安全保障技术和灾害防治技术，以最大限度地减缓和适应冰冻圈变化对工程构筑物的重大影响，这对于西部大开发、东北振兴和“一路一带”倡议均具有重要意义[1]。

冰冻圈区域的重大工程安全和正在运行的重大基础设施均会受冰川、冻土、积雪、海（河、湖）冰等冰冻圈各要素变化所诱发的冰冻圈灾害的巨大威胁；

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金（41690144、51979024）
修改稿收到日期：2020年3月30日

其中，气候变暖使冰冻圈区域工程安全和服役功能面临环境变化带来的新平衡及适应问题，容易诱发较大的风险，特别是目前正处于气候快速变化期。规划中的“一带一路”交通基础设施建设、北京—莫斯科高速铁路、中俄加美高速铁路、北极航线等重大工程建设和安全运行，将面临气候变化下冰冻圈变化的巨大挑战。

1 冰冻圈工程学主要研究任务

冰冻圈工程学是研究冰冻圈要素（如冰川、积雪、冻土、河冰、湖冰和海冰等）与工程构筑物之间相互作用关系的一门科学。作为冰冻圈科学服务于人类社会、促进社会可持续发展的重要分支学科，冰冻圈工程学处于与其他圈层之间相互作用及影响和适应的层面[2]。冰冻圈要素形成规律和变化过程是理解冰冻圈工程学的学科基础，冰冻圈各要素与工程活动间的相互影响机理及其对工程的适应途径、研发相对应的工程安全保障技术来适应冰冻圈各要素的变化及其影响，是冰冻圈工程学的核心内容。

冰冻圈工程学，除研究传统的工程地质条件、气象条件、海洋条件、水文条件等方面外，需要特别研究冰冻圈各要素的时空分布和变化特征、工程局地条件、冰冻圈环境与灾害等。这些基础工程环境条件，特别是冰冻圈各要素与工程有关的适应性条件，是冰冻圈影响区域工程建设的核心和应用基础。只有搞清了冰冻圈影响区域对工程影响的潜在极限作用力和构筑物承受外力的能力，才能够准确把握各类工程的设计原则、设计方法和工程技术措施，保证工程构筑物安全施工和运行。

因此，冰冻圈工程学研究的主要任务有：① 通过现场勘测、原位监测和数值模拟等方法，研究冰冻圈各要素分布特征及变化过程与工程稳定性和工程服役性相互作用关系，并预测冰冻圈各要素变化过程及其对工程稳定性的影响；② 研究人类活动对冰冻圈各要素环境的影响及其诱发的冰冻圈灾害，提出保障工程安全运营的工程设计原则、设计参数、工程技术措施和灾害防治技术，以及冰冻圈环境保护对策；③ 研究气候和环境变化影响下工程服役性及其对社会经济影响程度，提出气候变化下冰冻圈影响区域的工程建设规模和强度、工程的适应性技术和措施，以提升冰冻圈工程服务功能。

2 研究现状

冰冻圈各要素的认识和研究是伴随着冰冻圈区域工程建设开始的，社会经济发展需要使冰冻圈工程学得以迅速发展和壮大。因此，冰冻圈工程学的研究内容可能早于冰冻圈各要素分支学科的研究内容。

（1）冻土工程。20 世纪 30 年代—50 年代，各国先后围绕着重大基础设施开始了研究，如环北极地区的矿山、公路、铁路、机场、房屋、油气资源开发等工程。苏联通过横穿西伯利亚大铁路、西伯利亚—太平洋管道系统和北方城市建设推动了冻土和寒区工程研究[3]；加拿大通过马更些谷地油气开发和诺曼输油管线建设推动了冻土与寒区工程研究[4]；美国通过阿拉斯加输油管线的冻土工程设计和施工推进了寒区工程的研究，形成了冻土工程学科体系；其他一些国家在冻土工程研究也取得了一定的进展。从 20 世纪 50 年代开始，围绕着寒区水利基础设施、公路、铁路、输油管道等工程建设，我国在青藏高原冻土区和东北大、小兴安岭冻土区开展了大量的冻土工程研究[5]。青藏铁路工程建设，推动了我国冻土工程研究的快速发展，形成了冻土工程学科。

（2）冰川与积雪工程。20 世纪 50 年代初，国内数十个研究和工程部门等相继开展积雪和雪害的调查及防治研究。20 世纪 70 年代末，我国开展了冰川灾害的发生和发展趋势对冰川作用区的寒区公路工程影响的研究，预测了巴托拉冰川前进和变化趋势，为制定公路修复方案提供了重要的科学支撑。特别是较系统

地研究了积雪、风吹雪、雪崩及其危害机理和防治技术，提出了一套适合我国预防风吹雪的原则与综合治理的措施和设计方法等[6]，形成了一套较为完整的公路风吹雪理论体系。

（3）河、湖（水库）冰工程。许多国家均有各种河、湖（水库）冰工程构筑物，研究集中在河、湖冰形成、发展、消失全过程的数值模拟和模型开发方面。特别是利用历史和现时水文、气象资料，以及河流、水库和湖泊等水体的封冰和解冻的规律，预测未来冰情，以便提前制定应对和防范冰凌灾害事故发生的措施。为了减轻和防范冰对构筑物和生产安全运行的影响，需采取冰工程防治技术以确保工程安全。

（4）海冰工程。19世纪后期，俄罗斯和北欧科学家开展了破冰船设计和灯塔抗冰设计；冰封区军事基地建设推动美国和苏联开展了冰工程的研究。特别是北极地区的勘探和矿石能源为在冰区实现全年通航，海冰工程研究迅速发展。近年来，俄罗斯萨哈林、北极的巴伦支海和喀拉海的油气工程也带动了海冰工程的研究。中国渤海海冰研究起步于20世纪60年代初，主要针对渤海和黄海北部的核电站工程、离岸码头工程和风力发电工程开展了海冰工程研究，特别是海冰引起的结构振动及其破坏作用。冰工程设计中考虑的因素，如流冰的面积和密集度、冰的力学性质、冰对构筑物的作用方式等研究[7]，推动了海冰观测和数值化冰情等工作。围绕北极资源开发，冰-船相互作用和极地冰的工程力学性质研究将得以发展。

在气候变化、环境变化和人类活动的强烈影响下，全球变化对工程建设的影响，迫切需要刻画冰冻圈各要素与重大工程构筑物关系及其环境和灾害效应，提出冰冻圈环境保护措施、冰冻圈灾害防治及保障技术，以及冰冻圈工程建设的新技术和新方法。

3 冰冻圈要素与工程关系

气候变暖背景下冰冻圈各要素变化所诱发的灾害将对工程安全产生重要影响，同时作为工程地基的冻土也将受工程热扰动的影响，因而冰冻圈灾害的防治技术和冻土热稳定性的安全保障技术是冰冻圈区工程建设和安全运营的核心（图1）。

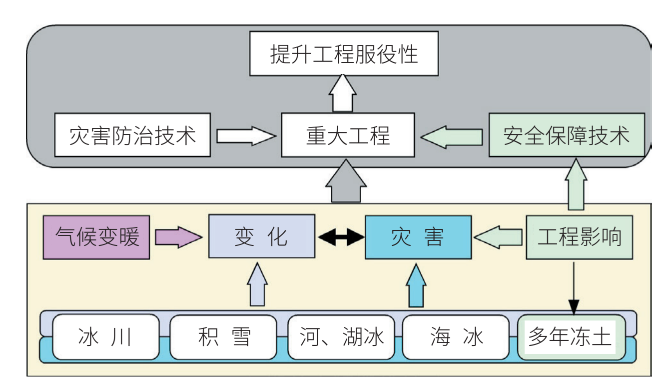


图1　冰冻圈各要素与工程的关系

冻土作为承载工程构筑物的地质体，与工程构筑物具有复杂的相互作用关系。一方面，工程热扰动会直接导致其下部冻土快速升温和融化，引起工程构筑物发生冻胀和融化下沉变形；另一方面，冻土变化也会诱发热融滑塌、融冻泥流、冻土滑坡等冻融现象的发生，影响其上部或周边工程构筑物的稳定性和安全运营。因此，冻土工程中不仅要针对工程不同的热源形式和热影响提出土体本身的冻胀和融沉预防技术措施，减缓对工程稳定性和服役性的影响，而且要研究工程影响诱发的次生灾害的防治技术。由于冻土与环境之间具有极为密切的关系，保护冻土环境可以减缓环境变化对冻土退化的影响，有利于减少工程病害[8]。

冰川和积雪既能以固体水源的形式作为工程建设区的水资源，又会以突发性变化诱发洪水、雪崩、雪堆等灾害，超越人类的防范能力。因此，冰川和积雪变化对工程安全运营存在较大的潜在危害，需采取工程技术措施来防治冰川和积雪对工程的影响。开展冰川的分布和冰雪灾害对影响区域内的工程稳定性影响和评价研究，并依据工程重要性分析历史冰川和积雪消融洪水的发生规模，以及预估未来冰雪消融洪水，

给出重要构筑物，如桥梁、隧道等设计原则和参数。因此，重要构筑物的冰雪灾害设防标准和工程设计参数及灾害防治方法是工程安全的核心[9]。

海（河、湖）冰可作为冬季临时构筑物或运输通道加以利用，同时构筑在海（河、湖）冰上固定式和浮式结构物需抵御海（河、湖）冰作用力，降低海（河、湖）冰的作用力破坏构筑物的风险。河、湖（水库）冰与工程相互作用主要体现在工程构筑物的抗冰能力和抗冰技术方面。对于河冰和渠道冰，需要认识冰塞和冰坝发生的规律，评估河冰对水工构筑物影响，评估渠道渡槽、边坡的静冰压力、河中桥墩上的流冰撞击力等，为构筑物设计的方案选择和优化、规划和施工提供依据。对于水库冰，需要在观测参数基础上建立水库边坡抗冰推的设计。对于海冰，要开展满足抗冰构筑物安全运营的设计。流动的海冰作用于刚性构筑物，构筑物寿命取决于冰的撞击力；而对于柔性构筑物而言，冰层破碎引起的构筑物振动及疲劳损伤决定构筑物寿命。

4 气候变化与冰冻圈工程服役性

受全球气候变暖的影响，冰冻圈各要素均发生显著的变化，从而影响冰冻圈区内工程建设和安全运营，改变了工程服役性。气候变化增加基础设施的脆弱性，对工程构筑物造成超出正常条件和使用预期的额外压力。

冰川快速消融导致的冰川洪水、冰湖溃决等冰川灾害出现的概率增加，重大灾害频繁发生。洪水、冰雪灾等环境灾害，影响冰冻圈区内的水电站、公路或铁路路基工程和桥梁等工程构筑物稳定性[10,11]，使工程服役性发生变化。为保证工程构筑物的安全运营，应对水电站和公路、铁路沿线的冰川和积雪灾害定期进行系统地评估，确定气候变化下工程的设防标准，提高工程服役性。

气候转暖正加速多年冻土发生退化，引起了热融滑塌、冻土滑坡等冻融灾害迅速增加，改变冻融循环频率，影响基础设施稳定性和脆弱性。近地表多年冻土层融化使得建筑物、公路、铁路、管道和油气基础设施的工程服役性发生变化。在气候变化背景下，评价冻土工程服役性需要研究量化气候变化对多年冻土区的基础设施的潜在影响，包括更全面地研究公共基础设施和环境压力之间的关系、基础设施的寿命及工程的运营和维护成本。

气候变暖将导致开河期提早、封河期推后、凌汛期缩短，继而导致凌汛灾害（如冰塞灾害、冰坝灾害、冰体压力和流冰撞击等）的发生和发展出现显著的变化[12]。凌汛灾害会对桥墩、码头、引水等建筑物及河、渠护岸产生重要的影响，同时也直接影响航运、桥梁、发电、给排水等工程的建设和运营，从而影响工程服役性。

气候转暖、海冰融化使北极无冰期延长，同时无冰范围扩大，使得冰期、冰密集度、流冰速度、冰厚度、冰温度及冰的物理和力学性质发生了变化，减少了海冰对工程的影响，提高了工程构筑物的服役性，增强了北极航道通行能力。但是，原以海冰为依托的工程构筑物，海冰融化降低了工程构筑物的服役性。同时，海冰融化后的流冰运动影响范围扩大，对北极冰区的工程构筑物的不确定性增大，厚冰层相对运动仍将会造成构筑物损坏。

5 “一带一路”互联互通中的主要工程问题

“丝绸之路经济带”贯穿欧亚大陆，沿线基础设施建设将会有许多特殊的工程问题，包括黄土、冻土和膨胀土的工程特性，工程建设中可能出现的地质灾害、地基和路基稳定性问题，以及生态环境问题[13]。同时，在沿线也广泛分布着冰川、积雪、多年冻土、海（河、湖）冰等，冰冻圈作用区突发性灾害和冻土地基稳定性将严重影响到“陆上丝绸之路”基础设施建设[14]。例如，中巴经济走廊需要穿越冰冻圈作用的

高海拔山区，气候变暖使冰湖溃决、洪水、泥石流、雪崩等突发事件的频率增加，这将直接威胁该地区水利工程设施和道路设施的安全运行；此外，冻融作用还导致该地区发生大量的边坡崩塌和失稳的地质灾害[15]。

穿越广泛的寒冷地区的“丝绸之路经济带”交通能源基础设施建设，将面临冰冻圈灾害及其诱发的各种工程安全隐患的挑战。冻土融化伴随的灾害及冻融影响下的岩石崩塌等灾害，会对在工程活动剧烈影响区的基础设施造成重要的影响。例如，中巴公路、中尼公路等、中蒙俄经济走廊工程基础设施、中俄加美高速铁路，都将面临冻土融化对重大工程的影响（图2）。北京—莫斯科高速铁路和中俄加美高速铁路建设，对工程稳定性提出了更高的要求，高铁筑路技术和冻土热稳定性控制技术将面临更大的挑战[16]。因此，需要研究冰冻圈各要素的变化、区域地质构造、地质灾害等与重大工程间相互作用关系、机理及其对重大工程稳定性和长期服役性的影响。

“一带一路”背景下的“冰上丝绸之路”建设主要包括北极航行相关的船舶工程和港口工程（图2），它们必然面临海冰和冻土要素的影响。对于应急的临时冰雪道路、机场和码头修筑技术应提前开展研究，海岸冻土热侵蚀、边岸坍塌和海底多年冻土融化控制技术等也将会成为影响基础设施安全的关键。同时，北极矿产资源开发和能源综合利用，还需在相对薄弱的工程“硬核”上提出相应的对策。例如，北极环境保护、矿山工程安全和高效资源开采技术，特别是破坏冻土力学研究可能会成为矿产资源开发利用的关键。

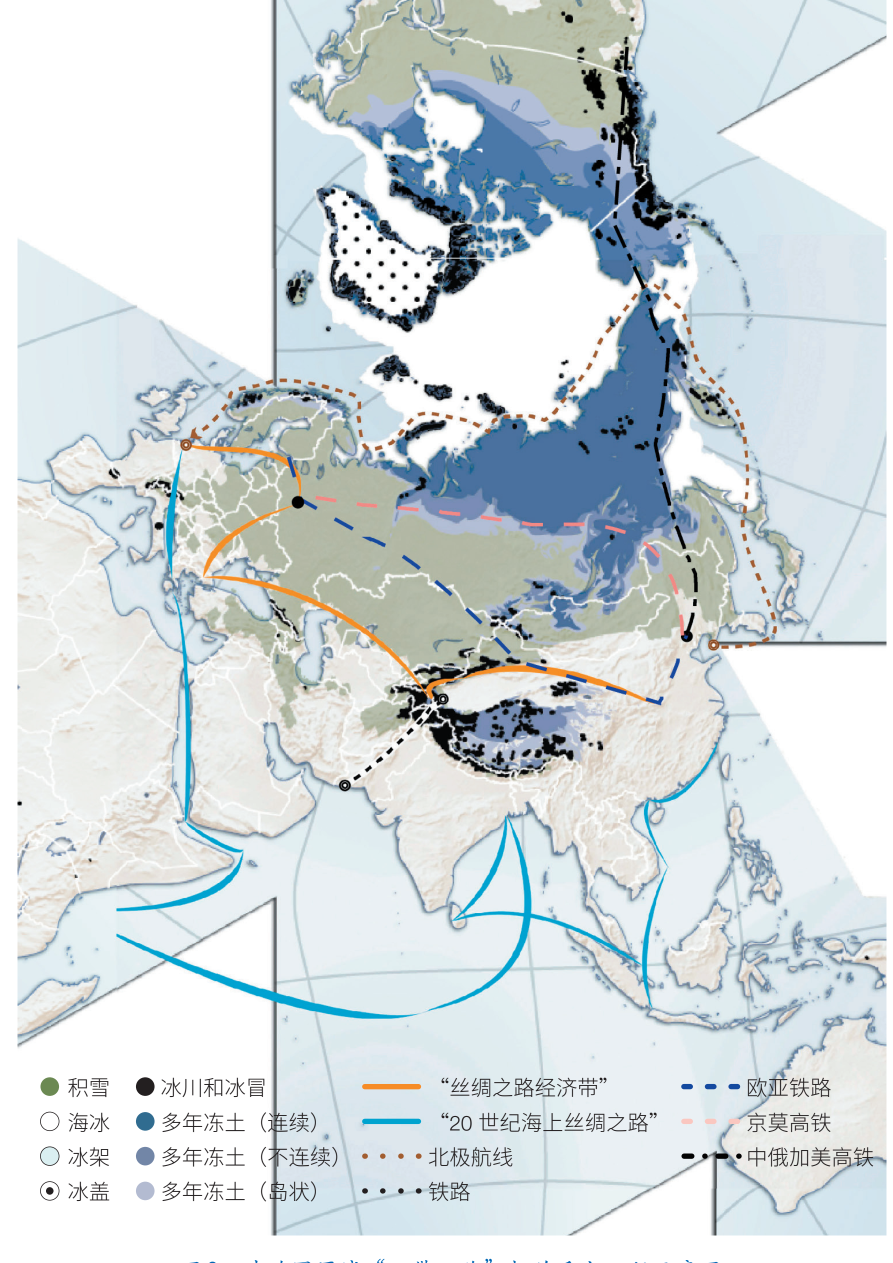


图2　冰冻圈区域“一带一路”相关重大工程示意图
根据文献[12]中图1修改而来

参考文献

1 秦大河. 冰冻圈科学发展战略. 北京: 科学出版社, 2017.
2 Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric Science:

research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5: 255-268.
3 Yershov E D. General Geocryology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
4 Johnstone G H. Permafrost Engineering Design and Construction. Toronto-New York-Chichester-Brisbane: John Wiley & Sons, 1981.
5 周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. 中国冻土学. 北京: 科学出版社, 2000.
6 王中隆. 中国风雪流及其防治研究. 北京: 科学出版社, 2001.
7 李志军, 严德成. 海冰对海上结构物的潜在破坏方式和减灾措施. 海洋环境科学, 1991, 10(3): 71-75.
8 吴青柏, 施斌. 试论青藏铁路修筑中的冻土环境保护问题. 水文地质工程地质, 2002, 4: 14-20.
9 沈永平, 王国亚, 魏文寿. 冰雪灾害. 北京: 气象出版社, 2009.
10 赵金顺, 魏庆朝, 李立军. 道路工程积雪灾害的安全设计与防治措施研究, 中国安全科学学报, 2004, 14(12): 3-8.
11 J M 雷诺兹, 左志安, 赵秋云. 冰川灾害对水电开发的影响评估. 水利水电快报, 2014, 35(10): 19-22.
12 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对黄河内蒙古段凌汛期的影响. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1751-1756.
13 乔建伟, 郑建国, 刘争宏, 等. "一带一路"沿线特殊岩土分布与主要工程问题. 灾害学, 2019, 34(S1): 65-71.
14 邱玉宝, Menenti M, 李新, 等. 地球大数据应用于高山与寒区观测和理解. 中国科学院院刊, 2017, 32(z1): 2-9.
15 崔鹏, 邹强, 陈曦, 等. "一带一路"自然灾害风险与综合减灾. 中国科学院院刊, 2018, 33(z2): 38-43.
16 马巍. 北京—莫斯科高铁工程走廊寒区工程问题与防治对策研究. 中国科学院院刊, 2018, 32(z2): 30-33.

Cryosphere Engineering Science Supporting Interactivity Infrastructures Construction

WU Qingbai[1*] LI Zhijun[2] SHEN Yongping[1]
(1 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract The cryosphere is closely related to climate change, human engineering activities and social and economic development. Each element of cryosphere has significantly different influence characteristics on engineering. Disasters by glaciers, snow cover, and sea (river and lake) ice will mainly affect the construction, safe operation, and serviceability of engineering. Frozen soil is a special foundation soil for engineering structures, thus freezing-thawing disasters and thermal and mechanical stability change of frozen soil will directly affect the stability of engineering. As global change, the elements of cryosphere change and its hydrological and ecological environment, surface process changes have significant influence on engineering, thus it is needed to strengthen the relationship research between the engineering construction and safety operation and the environmental factors change. In addition, engineering security technology is also needed to be more comprehensive to consider the influence of climate and environment changes. Therefore, climate and environmental change will become an important factor to be considered in the construction, safe operation, and serviceability of

* Corresponding author

engineering in the regions of cryosphere in the future. At the same time, the Belt and Road infrastructure construction not only brings opportunities to cryosphere engineering, but also faces greater challenges.

Keywords cryosphere, engineering, climate change, the Belt and Road



吴青柏 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室主任、研究员。国家杰出青年基金获得者。中国冰冻圈科学学会副秘书长、常务理事，中国能源学会天然气水合物专业委员会副主任委员。主要从事冻土环境与工程和冻土区天然气水合物研究，在多年冻土-气候-工程间相互作用等研究方面取得了重要成果。发表SCI论文120余篇，专著5部。先后获国家科学技术进步奖特等奖、创新团队奖、一等奖和二等奖各1项，以及西部突出贡献奖。E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

WU Qingbai Professor, Director of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLEFS), Chinese Academy of Sciences (CAS). He has been focusing on environment and engineering of permafrost, as well as gas hydrate in permafrost regions. He has published 260 peer-reviewed papers in domestic and international journals, such as *Journal of Geophysical Research*, *Global and Planetary*, *Scientific Report*, *Permafrost Periglacial Processes*, etc. Dr. Wu has received numerous awards for research and innovation, namely, the Special-Class, the Innovation Group, the First-Class, and the Second-Class Prize of the National Science and Technology Progress Award, China, respectively. E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

■责任编辑：岳凌生